

ИССЛЕДОВАНИЕ ИМПУЛЬСНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ МАССИВНЫХ В ТЕПЛОВОМ ОТНОШЕНИИ ЗАГОТОВОК

Аннотация

Для ускоренного технического процесса металлургии решающее значение приобрели определение и дальнейшая разработка резерва интенсивного энергосбережения, что ведет к созданию перспективных моделей теплотехнического комплекса черной металлургии будущего на базе техники нового поколения. В этом смысле можно говорить о том, что энергосберегающие технологии черной металлургии XXI века являются основой разработки и создания принципиальной новой техники, в том числе и печных агрегатов.

Ключевые слова: нагрев, симметрия, импульс.

Abstract

The determination and further development of the intensive energy saving reserve became crucially important for the accelerated technical process of metallurgy. These leads to the creation of promising models of the future ferrous metallurgy thermal engineering complex on the basis of the new generation equipment. In this sense, we can say that energy-saving technologies of XXI century ferrous metallurgy are the basis for the principled new technology development, including furnace units.

Key words: heating, symmetry, impulse.

В настоящее время разрабатывается и начинает находить применение новой перспективный способ нагрева металла – импульсно-скоростной нагрев при котором основная доля теплоты подводится к металлу конвективным способом. Импульсно-скоростной нагрев, состоящий из чередующихся периодов интенсивного нагрева и выдержки, предполагает повышенную скорость нагрева металла именно в период нагрева. В период же выдержки возможна реализация режимов, повышающих, снижающих или останавливающих неизменными во времени достигнутый уровень температуры центра [1]. Эффективность такого нагрева гораздо выше, чем при непрерывном подводе теплоты к нагреваемой поверхности. Аналогичные выводы справедливы и для процесса охлаждения вследствие того, что при непрерывном охлаждении новые и новые порции охладителя поступают в одну и ту же зону, поверхности которой уже охлаждались за счет первых порций охладителя, что приводит к снижению интенсивности теплоотдачи вследствие снижения градиента температур между металлом и охладителем [2]. Для нового повышения температуры поверхностных слоев металла необходимо время, в течение которого существует нагрев их изнутри за счет внутренних перетоков теплоты теплопроводностью от центра к поверхности.

Импульсное охлаждение позволяет расширить возможность управления этим процессом за счет изменения таких влияющих факторов, как длительность периодов интенсивного и малоинтенсивного охлаждения (выдержки), суммарная продолжительность цикла (охлаждение плюс выдержка), соотношение величин коэффициентов теплоотдачи в периоды охлаждения и выдержки [3].

Начальный перепад температур $\Delta T_{\text{нач}}$, определенный условиями нагрева за время периода интенсивного охлаждения $t_{\text{охл}}$ уменьшается при снижающихся температурах центра $T_{\text{ц}}$ и поверхности $T_{\text{пов}}$. Скорости снижения этих температур определяются параметрами внешнего и внутреннего теплообмена. По истечении периода интенсивного охлаждения по толщине заготовки формируется температурный период $\Delta T_{\text{охл}}$. Его величина является

начальным условием для формирования параметров периода выдержки влияет задача теплообмена в период выдержки. При этом температура поверхности может изменяться по следующим траекториям в период.

Эффективность использования различных схем импульсного охлаждения исследовалась на примере охлаждения заготовки в виде полого бесконечного цилиндра. В работе рассматривалось две схемы охлаждения: симметричная и асимметричная (рис. 1, 2).

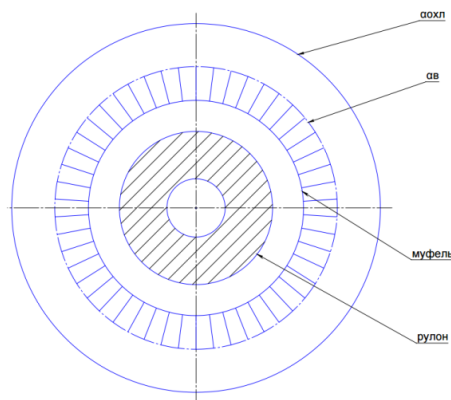


Рис. 1. Симметричная схема

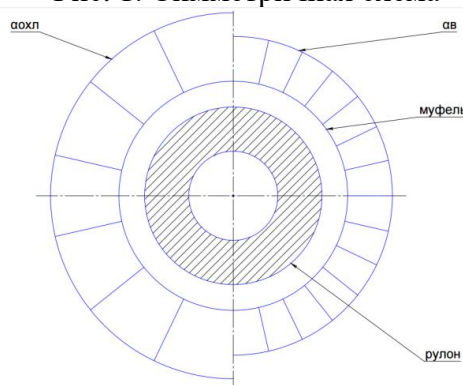


Рис. 2. Асимметричная схема

В основу математической модели импульсного охлаждения полого бесконечного однородного цилиндра положено дифференциальное уравнение нестационарной теплопроводности без источников теплоты, записанное в цилиндрических координатах ($\lambda \neq \lambda(T)$):

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right), \quad (1)$$

где T – температура цилиндра на расстоянии r от его оси в момент времени t , °С;

t – время, с;

a – коэффициент температуропроводности охлаждаемого металла, м²/с;

z – длина цилиндра, м;

φ – угол направления радиуса в сечении цилиндра, град.

Поскольку для бесконечного цилиндра теплообменом на торцевых поверхностях по сравнению с боковой можно пренебречь, то:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0.$$

Кроме того, анализируется случай осесимметричной задачи, т.е. температура металла не является функцией угла φ , следовательно:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 T}{\partial \varphi^2} = 0.$$

С учетом принятых допущений дифференциальное уравнение (1) принимает вид:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = a \left(\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial r^2} \right). \quad (2)$$

Из уравнения (2) видно, что температура цилиндра является функцией только двух величин, а именно, времени t и радиуса r .

Дифференциальное уравнение решалось при следующих условиях однозначности:

1. Начальные условия, при $T=0$ $T(r,0)=T_{\text{нач}}$: при расчете было принято, что начальная температура охлаждаемого металла $T_{\text{нач}}=680$ °С и постоянна по всему сечению цилиндра.

2. Геометрические условия: внешний диаметр цилиндра принимался $D=0,5$ м, внутренний диаметр цилиндра – $d=0,1$ м.

3. Физические условия: при расчете принималось, что теплофизические характеристики цилиндра (коэффициент теплопроводности, удельная теплоемкость и плотность) постоянны по всему объему и не зависят от температуры.

4. Граничные условия третьего рода. Температура охлаждающей среды имела постоянное значение $T_o=20$ °С, а коэффициент теплоотдачи в период охлаждения изменился в пределах $\alpha_{\text{охл}}=100\text{--}500$, Вт/(м² К).

Отличительной особенностью исследуемого импульсивного охлаждения является то, что цикл охлаждения разбивается на два периода: период интенсивного охлаждения длительностью $t_{\text{охл}}$ и период выдержки длительностью $t_{\text{выд}}$, таким образом суммарная продолжительность одного цикла $t_{\text{ц}}$ равна:

$$t_{\text{ц}}=t_{\text{охл}}+t_{\text{выд}}.$$

Расчеты проводились при различных соотношениях длительностей периодов $t_{\text{охл}}$ и $t_{\text{выд}}$, при этом $t_{\text{охл}}=5\text{--}20$ минут и $t_{\text{выд}}=5\text{--}20$ минут. Значения коэффициента теплоотдачи в период охлаждения изменялись.

В работе принималось, что коэффициент теплопроводности в радиальном направлении $\lambda=5$ Вт/(м К).

Суммарная плотность теплового потока от внешней поверхности муфеля, Вт/м²:

$$q_{\Sigma}=q_{\text{кон}}+q_{\text{луч}}.$$

Суммарная плотность теплового потока от внешней поверхности рулона, Вт/м²:

$$q'_{\Sigma}=q'_{\text{кон}}+q'_{\text{луч}}.$$

где $q_{\text{кон}}$ – плотность теплового конвективного потока на внутренней поверхности муфеля, Вт/м²; $q'_{\text{кон}}$ – плотность теплового конвективного потока на внутренней поверхности рулона, Вт/м².

$$q_{\text{кон}}=\alpha_{\text{охл}}(T_{\text{муф}}-T_o); \quad q'_{\text{кон}}=\alpha_{\text{зг}}(T_{\text{рул}}-T_{\text{зг}}),$$

а $q_{\text{луч}}$ и $q'_{\text{луч}}$ – плотности теплового лучистого потока муфеля и рулона соответственно, Вт/м².

$$q_{\text{луч}} = c_{\text{пр}}^{\text{муф-ос}} \left[\left(\frac{T_{\text{муф}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{ос}}}{100} \right)^4 \right];$$

$$q'_{\text{луч}} = c_{\text{пр}}^{\text{муф-рул}} \left[\left(\frac{T_{\text{рул}}}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{\text{муф}}}{100} \right)^4 \right],$$

где приведенные коэффициенты излучения муфеля и рулона

$$c_{\text{пр}}^{\text{муф-ос}}=c_{\text{муф}}=\xi_m \cdot c_o;$$

$$c_{\text{пр}}^{\text{рул-ос}}=c_{\text{рул}}=\xi_{\text{рул}} \cdot c_o;$$

ξ_m – степень черноты,

c_o – константа излучения абсолютно черного тела, Вт/(м²К⁴).

Перенос теплоты внутри цилиндра осуществляется теплопроводностью:

$$q_m = -\lambda_{\text{эф}} \frac{\partial T}{\partial r},$$

где $\lambda_{\text{эф}}$ – эффективный коэффициент теплопроводности, Вт/(м К);

r – текущий радиус.

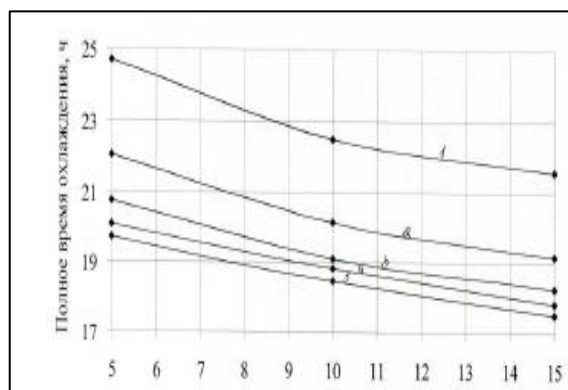
Приняты следующие обозначения: «ос» – окружающая среда; «муф» – муфель; «рул» – рулон; «зг» – защитный газ; «о» – охлаждающая среда.

Асимметричная схема охлаждения заключается в том, что на одну половину боковой поверхности муфеля в течение определенного времени подаются струи охладителя с большой скоростью, в то же время на другой половине боковой поверхности идет процесс малоинтенсивного охлаждения. Через определенный промежуток времени холодный

подаются уже на ту половину, где была выдержка. Таким образом, процессы интенсивного охлаждения и выдержки с разных сторон муфеля идут одновременно.

При симметричной же схеме происходит чередование периодов охлаждения и выдержки одновременно по всей боковой поверхности.

Влияние продолжительности периода охлаждения $t_{охл}$ на полное время охлаждения металла показано на рис. 3 (симметричная схема) и рис. 4 (асимметричная схема). При симметричной схеме возникают большие перепады температуры между поверхностью рулона и муфелем, что способствует ускорению процесса охлаждения. При асимметричной схеме охлаждения зависимость обратна.



$t_{охл}=5$ мин ($t_в=15$ мин); $t_{охл}=10$ мин ($t_в=10$ мин);
 $t_{охл}=15$ мин ($t_в=5$ мин):

1 – $\alpha_{охл} = 100$ Вт/(м² К),

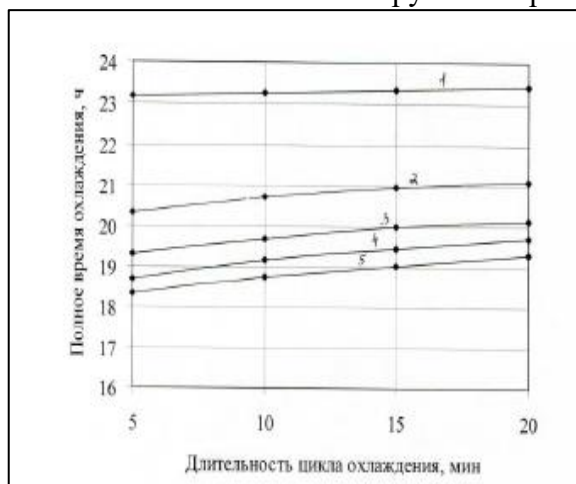
2 – $\alpha_{охл} = 200$ Вт/(м² К),

3 – $\alpha_{охл} = 300$ Вт/(м² К),

4 – $\alpha_{охл} = 400$ Вт/(м² К),

5 – $\alpha_{охл} = 500$ Вт/(м² К)

Рис. 3. Влияние длительности цикла охлаждения на полное время охлаждения рулонов при симметричной схеме



$t_{охл}=t_в=5$ мин;

$t_{охл}=t_в=10$ мин;

$t_{охл}=t_в=15$ мин;

$t_{охл}=t_в=20$ мин:

1 – $\alpha_{охл} = 100$ Вт/(м² К),

2 – $\alpha_{охл} = 200$ Вт/(м² К),

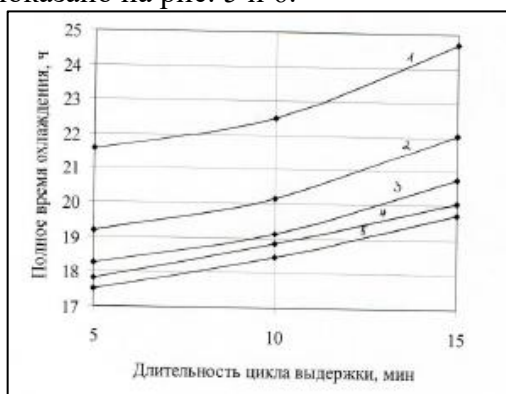
3 – $\alpha_{охл} = 300$ Вт/(м² К),

4 – $\alpha_{охл} = 400$ Вт/(м² К),

5 – $\alpha_{охл} = 500$ Вт/(м² К)

Рис. 4. Влияние длительности цикла охлаждения на полное время охлаждения при асимметричной схеме

Влияние длительности периода выдержки $t_в$ на суммарное время охлаждения металла показано на рис. 5 и 6.



$t_в=5$ мин ($t_{охл}=15$ мин);

$t_в=10$ мин ($t_{охл}=10$ мин);

$t_в=15$ мин ($t_{охл}=15$ мин):

1 – $\alpha_{охл} = 100$ Вт/(м² К)

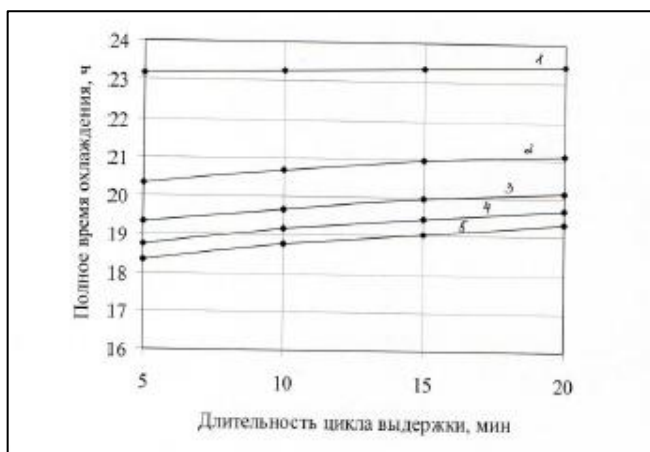
2 – $\alpha_{охл} = 200$ Вт/(м² К)

3 – $\alpha_{охл} = 300$ Вт/(м² К)

4 – $\alpha_{охл} = 400$ Вт/(м² К)

5 – $\alpha_{охл} = 500$ Вт/(м² К)

Рис. 5. Влияние длительности цикла выдержки на полное время охлаждения при симметричной схеме



$t_{\text{в}}=5$ мин ($t_{\text{охл}}=15$ мин);
 $t_{\text{в}}=10$ мин ($t_{\text{охл}}=10$ мин);
 $t_{\text{в}}=15$ мин ($t_{\text{охл}}=15$ мин):
 1 – $\alpha_{\text{охл}} = 100$ Вт/(м² К)
 2 – $\alpha_{\text{охл}} = 200$ Вт/(м² К)
 3 – $\alpha_{\text{охл}} = 300$ Вт/(м² К)
 4 – $\alpha_{\text{охл}} = 400$ Вт/(м² К)
 5 – $\alpha_{\text{охл}} = 500$ Вт/(м² К)

Рис. 6. Влияние длительности цикла выдержки на полное время охлаждения при асимметричной схеме

Для снижения полного времени охлаждения необходимо использовать либо асимметричную схему охлаждения при минимальном времени цикла, равном 5 минутам, либо симметричную схему с временем охлаждения – 30 минут и временем выдержки – 5 минут.

Список использованных источников

1. Прибытков И.А. Теплообмен излучением: уч. пособие / И.А. Прибытков. – М. МИСИС. 2008. – 98 с.
2. Теплотехника металлургического производства. Т.2 / Под редакцией В.А. Кривандина. – М. МИСИС, 2002. – 736 с.
3. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей / В.А. Арутюнов, В.В. Бухмиров, С.А. Крупенников. – М.: Металлургия, 1990. – 239 с.
4. Гусовский В.Л. Методики расчета нагревательных и термических печей / В.Л. Гусовский, А.Е. Лифшиц. – М.: Теплотехник, 2004. – 400 с.

УДК 62–533.6

Е. В. Приходько, А. С. Никифоров

Павлодарский государственный университет имени С. Торайгырова,
г. Павлодар, Казахстан

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ АГРЕГАТОВ

Аннотация

В статье рассмотрена надёжность работы высокотемпературных агрегатов в рамках надёжности работы его футеровки. Определение надёжности тепловой работы футеровки и прогнозирование её дальнейшей работы без допущения превышения эксплуатационных пределов, осуществляется различными способами. Специфика эксплуатации футеровок высокотемпературных агрегатов ограничивает применение способов теплового контроля их работы. Авторами статьи для этих целей предложен способ определения теплового состояния футеровки высокотемпературного агрегата, который позволяет с достаточной точностью определять температурные поля в футеровке высокотемпературного агрегата с минимальным нарушением целостности футеровки. Его применение в лабораторных условиях показало его достаточную точность и простоту.

Для определения надёжности работы высокотемпературных агрегатов были определены наиболее значимые факторы, влияющие на продолжительность эксплуатации.